

1-4-2019

Bayesian Evaluation Method for Energy Efficiency of Manufacturing System Based on Combined Weights

Dongfeng Cao

School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

Wang Yan

School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Bayesian Evaluation Method for Energy Efficiency of Manufacturing System Based on Combined Weights

Abstract

Abstract: The energy consumption of discrete manufacturing system presents many complex characteristics such as multi-source, multi-level and dynamic uncertainty, which make energy efficiency analysis and evaluation very difficult. *The evaluation index system of energy efficiency of discrete manufacturing system is constructed from three aspects: manufacturing equipment, processing tasks and products. The improved Bayesian probability evaluation model is adopted for energy efficiency evaluation. In determining the weight link, the dynamic modified AHM method is combined with entropy weight method to make up the uncertainty of the structure and parameters of the Bayesian model, and to synthesize the subjective and objective two aspects of the index weight value, and to improve the stability and objectivity of the energy efficiency evaluation algorithm. An example is given to illustrate the effectiveness of the method.*

Keywords

manufacturing system, evaluation index system, Bayesian method, synthetical evaluation

Recommended Citation

Cao Dongfeng, Wang Yan. Bayesian Evaluation Method for Energy Efficiency of Manufacturing System Based on Combined Weights[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(11): 4313-4322.

基于组合权重的制造系统能效贝叶斯评价方法

曹东风, 王艳

(江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 离散制造系统能耗呈现出的多源、多层次、动态不确定等复杂特性, 导致能效分析与评价十分困难。从制造设备、加工任务和产品三个方面, 构建离散制造系统能效的评价指标体系。能效评价采用改进的贝叶斯概率评价模型。在确定权重环节采用了动态修正的AHM方法与熵权法相结合的方法, 弥补贝叶斯模型结构和参数的不确定性缺陷, 并综合主观、客观两方面的指标权重值, 提高能效评价算法的稳定性与客观性。最后通过算例分析和仿真验证了该方法的有效性。

关键词: 制造系统; 评价指标体系; 贝叶斯方法; 综合评价

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 11-4313-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201811032

Bayesian Evaluation Method for Energy Efficiency of Manufacturing System Based on Combined Weights

Cao Dongfeng, Wang Yan

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The energy consumption of discrete manufacturing system presents many complex characteristics such as multi-source, multi-level and dynamic uncertainty, which make energy efficiency analysis and evaluation very difficult. The evaluation index system of energy efficiency of discrete manufacturing system is constructed from three aspects: manufacturing equipment, processing tasks and products. The improved Bayesian probability evaluation model is adopted for energy efficiency evaluation. In determining the weight link, the dynamic modified AHM method is combined with entropy weight method to make up the uncertainty of the structure and parameters of the Bayesian model, and to synthesize the subjective and objective two aspects of the index weight value, and to improve the stability and objectivity of the energy efficiency evaluation algorithm. An example is given to illustrate the effectiveness of the method.

Keywords: manufacturing system; evaluation index system; Bayesian method; synthetical evaluation

引言

制造业作为国家发展的重要支撑, 虽然带来了巨大的社会财富, 但同时也有着资源浪费、环境

污染等问题。能源利用率较低的问题已成为当前经济和社会发展亟待解决的瓶颈。加强企业能效评价、准确反映企业的能效水平是提高系统制造系统能量效率的有效方法^[1]。离散制造系统的能耗系统可以看作一个多层次、多源、复杂的能量流网络, 物料流、能量流和信息流耦合、贯穿于整个制造过程的。离散制造系统作为以产品为要输出的复杂系统, 涉及产品层、车间层、任务层、生产设备层等



收稿日期: 2018-05-20 修回日期: 2018-07-02;
基金项目: 国家自然科学基金(61572238), 江苏省杰出青年基金(BK20160001);

作者简介: 曹东风(1991-), 男, 江苏徐州, 硕士生, 研究方向为离散制造系统能效优化; 王艳(1978-), 女, 江苏盐城, 博士后, 教授, 博导, 研究方向为制造系统能效优化。

<http://www.china-simulation.com>

• 4313 •

多个层次,每个层次的能量消耗特性也不同。因此离散制造系统也就具有能耗主体的复杂性及多样性、能耗状态的随机性、能耗过程的动态变化性、产品周期能耗特性等多种特性。离散制造系统能耗构成的复杂性、能耗指标间相互影响、能耗分析结果难以获取等问题是制造系统能效分析与评价困难的关键因素。

目前,虽然国内外对提高能源利用率问题的研究日益深化,但在能效测评过程中,原有的评价体系无法很好地适用实际用能系统。因此,难以实现对实际系统全面、准确地能效评估。郑朝闻^[2]使用主成分分析法分析采集到的数据,在此基础上建立了动态标准用于评价制造系统运行绩效,以此作为制造系统运行表现评价的依据。张浩^[3]采用熵权原理,确定各个评价目标的输入、输出指标熵权值,然后使用一种利用熵权约束的超效率 SBM (Slacks-based Measure, SBM)模型。在此基础上,构建了柔性制造系统评价指标体系,进而提出了一种基于信息熵及超效率 SBM 模型的柔性制造系统绩效评价方法。对于评价方法,国内外科研工作者已将多种评价方法应用于系统的综合评价中,典型方法主要分为三种。一种为主观综合评价方法,主要有有层次分析法(AHP)、专家权重评价法等。如 Ma 等^[4]将 AHP 方法应用于评估印染废水深度处理问题。文中采用专家评价和权重计算方法对九个指标和四种方案的优缺点进行综合分析,并提出了建议。主观评价方法往往受到所选专家组及用来描述被评估对象特征的指标体系的影响。一种为客观综合评价方法主要有熵值法、模糊综合评价法、灰色关联度法^[5]等。例如 Fu 等^[6]在信息系统的风险评估过程中,对风险因素的权重计算采用熵权系数法确定因素权重以减少传统权重确定方法的主观偏差。客观评价方法完全依赖数据,如果出现数据值的波动,结果也会发生变化。第三种就是组合评价方法^[7],将前两种方法揉合到一起,对系统进行综合评价等。如 Lee 等^[8]在两个阶段中分别用模糊层次分析法用区间值代替模糊数来反映人类思维的

模糊性,用数据包络分析方法用经济观点衡量能源技术对高油价的相对效率。以作为决定决策者有效分配有限的 R&D 资源的基本决策数据。

总的来说,所选择的评估方法,对综合评价的结果也会差生影响。对同一组评价对象使用不同方法进行评估,其得到的水平结果可能不同。因此,能效评价模型存在灰色性和不确定性。贝叶斯方法^[9]是一种基于数理统计的方法,它可以由样本数据的特征推导出事件发生的概率,具有推理能力强、易于理解、计算方便等特点。从概率的角度给出最有可能的评价结果,更具有可靠性。

1 制造系统能效评价指标体系

制造系统运行绩效评价体系的建立是实现制造系统能效综合评价的关键,直接关系到整个系统能效水平评价的客观性和有效性。因此,必须以实际制造情况为基础,在构建综合评价指标的过程中,建立更加全面的评价体系^[10-11]。

离散制造系统主要由生产环境、生产对象、生产设备三大元素构成^[12]。根据散制造系统的耗能特点和能耗的层次特性,从离散制造系统产品、设备、任务 3 个层次,确立了 3 个一级指标:产品能效水平、设备能效水平和任务流程能效水平。各一级指标下分别有以下若干个二级指标。

1、产品层指标

产品层能效指标显示单位产品条件下离散制造系统所消耗的能源量、节能水平等。

(1) 单位产品综合能耗:是指工厂中得到单位数量产品所消耗的能耗。

(2) 单位产品节能量:是指在优化生产资源调度或工艺水平前后,企业生产单位产品耗能的差值大小。

(3) 万元产品能耗:指企业每万元工业产值所消耗的电能量,能够反映企业一定工业产值下的能耗水平。

(4) 万元增加值能耗:是指企业每万元增加工业产值所消耗的电能量,能够说明企业一定工业产

值下的增加能耗的情况。

2、设备层指标

设备能效指标能够反映离散制造系统的加工设备性能、技术水平、能源转换效率等。

(1) 加工设备能效: 指定周期长度内能耗设备的能量利用率。

(2) 输送设备效率: 指定一段时间内除加工设备以外, 用于转移零件、材料等设备的效率。

(3) 能源加工转换效率: 指定周期长度内能源经过转换、加工后, 生产出的各种产品的数量占整个周期内能源加工转换投入量的百分比。

(4) 整体设备效率: 由于企业经营问题、原料短缺、设备故障等原因, 每台设备的运行状态不同,

有些设备会闲置, 或者暂时停工等问题。以此衡量整体设备的可用率、质量指数及表现性。

3、任务层指标

(1) 生产工艺能效: 反映企业主要生产流程的能效水平、管理水平, 主要以生产流程中设备的耗能占总耗能的百分比来反映此指标的大小。

(2) 生产资源调度能效: 反映企业生产排产的能效水平、调度水平, 主要以生产过程中生产资源调度前后耗能差值占调度前耗能的百分比来反映此指标的大小。

(3) 能源输送效率: 企业在生产加工时, 能源在输送过程中实际用到的能量量占输出总量的百分比。

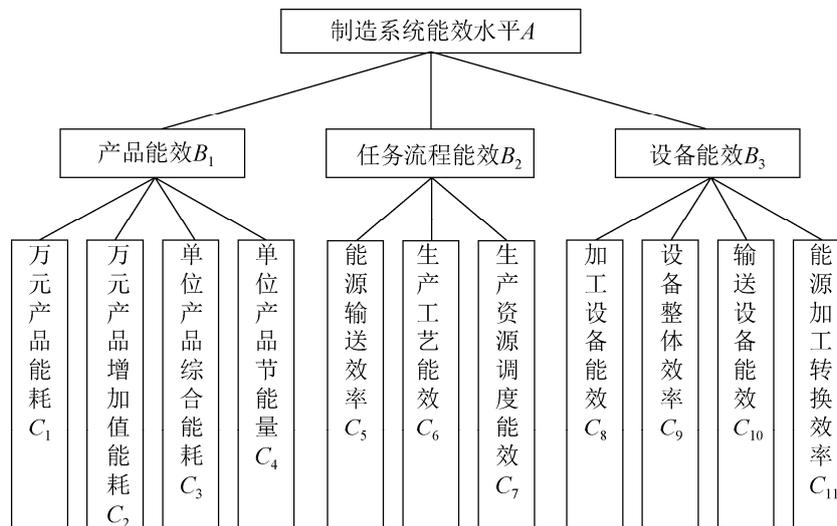


图 1 制造系统评价指标体系

Fig. 1 Index of manufacturing system

2 组合权重的贝叶斯评价模型

2.1 动态主观权重确定

在已有的综合评判方法中, 各指标主观权重在使用具体的方法确定后就为一个固定值, 在整个评价过程中不再改变, 适应性较低。刚开始时得到的权重值还应当针对具体的行业标准、具体的系统特点以及操作人员的知识水平等实际影响因素做出一定的调整, 使得综合评估的结果尽可能反映当前实际的能效水平。对于主观权重的确定方法, 本文

采用属性层次法^[13](Attribute Hierarchical Model, AHM)。AHM 方法是一种简洁实用的多准则决策方法, 能够对定性问题进行定量分析。它将各个指标划分为相互关联的有序结构, 再将专家的主观意见和分析者的判断结合起来, 以此确定指标权重。属性层次模型 AHM 与层次分析法 AHP 有很大的相似, 与 AHP 相比, AHM 更加简便易行, 不需要特征向量, 也不需要一致性检验。基于 AHM 的权重计算方法如下:

(1) 建立判断矩阵 $A = \{a_{ij}\}$, 比较同一等级指

标之间的相对重要性, 其中 $a_{ij} = 1/a_{ji}$, $a_{ii} = 1$ 。

(2) 将 $A = \{a_{ij}\}$ 通过公式转化为测度矩阵。

$$\mu = \begin{cases} \frac{\beta k}{\beta k + 1} & a_{ij} = k \\ \frac{1}{\beta k + 1} & a_{ij} = \frac{1}{k} \\ 0.5 & a_{ij} = 1, i \neq j \\ 0 & a_{ij} = 1, i = j \end{cases} \quad (1)$$

式中: $k \geq 1$ 且 $k \in N$, 这里设置 $\beta = 1$ 。

(3) 计算单层指标权重

计算底层指标相对于其高一级指标的权重值 $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$, 其中

$$w_i = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n \mu_{ij}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1, 0 \leq w_i \leq 1, n = 10 \quad (3)$$

(4) 指标权重修正

当实际的生产环境发生改变时, 要根据具体情况对专家权重进行修正。为此, 本文采用权重修正值 γ_i 来为确保同级评价指标之间的权重平衡。对 n 个需要进行修正的评价指标权重, 变化后的权重值的确定如式(4)所示:

$$w_i = w_{i0} + \gamma_i \quad (4)$$

式中: w_{i0} 和 w_i 分别为修正前后的权重。同时 γ_i 应满足式(5), 这样使修改前后指标权重满足权重和为 1 的要求。

$$\sum_{i=1}^n \gamma_i = 0 \quad (5)$$

2.2 基于熵权法的客观指标权重确定

熵权法是以各个指标所包含有效成分的大小为基础, 确定综合指标权重的大小的数学方法^[14]。它根据指标携带信息的可靠程度来确定权重, 能够避免权重计算过程中的主观干扰。熵权法的基本步骤如下:

(1) 原始数据矩阵

假设一个多属性决策问题中有 M 个评价指标, N 个备选方案, 其评价指标矩阵可定义为

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1M} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{N1} & y_{N2} & \dots & y_{NM} \end{bmatrix}$$

式中 y_{ij} 表示第 i 个评价指标在第 j 个备选方案的指标值。

(2) 指标矩阵标准化

由于各项指标的计量单位并不相同, 矩阵 Y 中的元素值并不是越大表示评价效果越好。所以, 在使用它们来计算指标权重之前, 首先需要对处理的数据进行标准化, 即将不同标准下指标的绝对值转换为同一标准下的相对值, 从而解决不同单位指标值的同质性问题。由于正向指标和反向指标表示的意义是不同的(正向指标是指值越高其表现越好, 反向指标与此相反), 因此需要用不同的算法来标准化正负指数的数据处理。对于正向指标和反向指标分别按照式(6)、(7)进行同向化处理。

$$r_{ij} = \frac{\max_j \{y_{ij}\} - y_{ij}}{\max_j \{y_{ij}\} - \min_j \{y_{ij}\}} \quad (6)$$

$$r_{ij} = \frac{y_{ij} - \min_j \{y_{ij}\}}{\max_j \{y_{ij}\} - \min_j \{y_{ij}\}} \quad (7)$$

式中: $\max\{y_{ij}\}$ 与 $\min\{y_{ij}\}$ 分别表示矩阵 Y 中第 i 行元素的最大值和最小值; 矩阵 R 中的各元素最大值为 1, 最小值为 0, 即 $r_{ij} \in [0, 1]$, $i = 1, 2, \dots, M$, $j = 1, 2, \dots, N$ 。

(3) 确定指标比重

按照式(8)计算第 j 个备选方案的第 i 个评价指标 r_{ij} 在指标 i 上所占的比重 p_{ij} ,

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^N r_{ij}} \quad (8)$$

(4) 熵值计算

第 i 个评价指标的熵表示为

$$H_i = -k \sum_{j=1}^N (p_{ij} \ln p_{ij}) \quad (9)$$

式中, 当 $p_{ij} = 0$ 时, $p_{ij} \ln p_{ij} = 0$, 为了满足限制条件 $0 \leq H_i \leq 1$, 取 $k = 1 / \ln N$ 。

(5) 评价指标的熵权

$$w_i = \frac{1 - H_i}{N - \sum_{k=1}^N H_k} \quad (10)$$

式(10)满足条件 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 。

2.3 综合权重确定

AHM 权确定重方法的优点是能够充分利用领域专家长期积累的生产加工经验, 得到的结果更贴近生产实际。但由于人的知识水平的有限, 由专家打分得到的判断矩阵受管理人员的知识结构、判断水平以及他们有限的个人经验等诸多主观因素影响。过分依赖于专家及指导人员的主观个人判断容易使结果不可靠。熵权方法以各决策单元的指标值为输入变量, 输出指标权重, 其结果不受主观因素影响, 但缺点是完全根据数据判断, 无法考虑其他的影响因素。

为此通过引入主、客观偏重系数的概念, 用线性加权方法结合 AHM 与熵权法两种方法求得综合指标权重, 如式(11)所示。

$$w^* = \theta w_a + (1 - \theta) w_b \quad (11)$$

式中: w^* 为综合权重; θ 为主观偏重系数, $\theta \in [0, 1]$, 由决策者依据偏好给出, 表示结果对不同权重的依赖程度。

2.4 改进贝叶斯能效评价模型

制造系统能效水平评价贝叶斯模型为:

$$P(B_i|A) = \frac{P(B_i)P(A|B_i)}{\sum_{i=1}^s P(B_i)P(A|B_i)} \quad (12)$$

式中: B_i 代表能效水平等级; A 代表实际能效指标值; $P(B_i)$ 表示为等级 B_i 发生的先验概率, 即通过先验直觉判断系统能效等级为 i 的可能性; $P(A|B_i)$ 为条件概率, 表示当前系统的能效水平为 i 等级时, 系统的实际指标值大小为 A 的可能性; $P(B_i|A)$ 为后验概率, 即在已知当前系统能效水平指标值为 A 的条件下, 能效水平属于 i 级别的可能性。采用贝叶斯评价模型实现制造系统能效水平评价的过程

步骤如下:

Step 1: 采用贝叶斯公式评价制造系统能效水平。令 B_s 为指标水平类型, 其值用 y_s 表示; A 为所选指标, 其值用 x_t 表示; s 为标准级别, 数量为 M ; t 为指标序号, 数量为 N 。则式可改写为:

$$P(y_s|x_t) = \frac{P(y_s)P(x_t|y_s)}{\sum_{s=1}^M P(y_s)P(x_t|y_s)} \quad (13)$$

式(13)为本文制造系统能效水平评价贝叶斯模型。

Step 2: 在无任何信息的情况下, 所选代表评价点的制造系统能效水平类型多难以确定, 但在制造系统能效水平评价中可认为制造系统能效水平属于任一级别的概率均相等, 即可以认为

$$P(y_i) = \frac{1}{M}, i = 1, 2, \dots, M \quad (14)$$

则式(13)可改写为:

$$P(y_s|x_t) = \frac{P(x_t|y_s)}{\sum_{s=1}^M P(x_t|y_s)} \quad (15)$$

Step 3: 已有的条件概率的计算方式是采用距离法, 主要是先采用实际的指标值与所设置的制造系统能效水平标准值之间差值的绝对值 L_{ts} , 用其倒数进行计算, 如式(16)所示:

$$P(x_t|y_s) = \frac{1/L_{ts}}{\sum_{s=1}^M 1/L_{ts}} \quad (16)$$

其中 $L_{ts} = |x_t - y_s|$, $t=1, 2, \dots, N$ 。式中当 x_t 趋近于 y_s 时, $P(x_t|y_s)$ 的值趋向于 1, 即当指标水平 $x_t=y_s$ 时系统整体水平就为 x_t , 缺乏根据。因此, 使用公式(16)计算的话结果的可靠性就降低。本文做出如下改进, 引入误差系数 λ 。 λ 的大小由以往预测结果值与指标值的比值决定。 $P(x_t|y_s)$ 计算方法如下:

$$P(x_t|y_s) = \lambda \frac{1/L_{ts}}{\sum_{s=1}^M 1/L_{ts}} \quad (17)$$

Step 4: 将式(17)带入式(15)计算 $P(y_s|x_t)$ 。

Step 5: 计算综合制造系统能效水平的后验概率。

$$P_s = \sum_{i=1}^N w_i P(y_s | x_i) \quad (18)$$

式中, w_i 为指标权重, 根据各指标对研究领域制造系统能效水平的影响程度来决定, 采用上面主观权重和客观权重相结合的理论方法确定。

Step6: 采用最大概率原则确定系统能效水平所属类别。在得到的每个水平等级对应的 P_s 后, 取其中的最大者所对应的 s 为系统的能效水平等级。

$$P_v = \max P_s, s = 1, 2, \dots, M \quad (19)$$

2.5 多级指标评价的实现

现有多级指标评价的策略, 大多数采用由底层指标开始逐层往上的评价策略, 下一层指标根据量化分析方法得到的评价结果作为上一层指标量化分析过程的输入值, 不断的重复底层指标对上级的指标评价过程。

这种评价方法评价过程的逻辑结构比较清晰, 但也存在一些弊端, 在逐层评价的过程中传递的有效信息减少。这样带来的结果就是评价方法的可靠性降低, 结果的准确性降低, 所以这种评价模式对评价方法的要求比较高。为此, 本文采用的评价策略是使用底层指标直接对各个等级指标做出评价, 尽量保持信息传递的完整性, 使评价结果更可靠。

根据公式(1)分析可以得到, 在权重确定过程中, 其底层指标对二级指标的判断矩阵是底层指标对一级指标判断矩阵的一个子矩阵。因此, 在专家完成底层指标对一级指标的重要性估分过后, 可以直接取子矩阵作为二级指标评价的判断矩阵。而且, 对二级指标的测度矩阵为对一级指标测度矩阵的子矩阵。因此, 只需要专家组对指标进行打分评估一次即可。

3 算例分析

为了更好地阐述本文采用的评价方法, 下面本文选取甲、乙两家工厂的产品生产过程为背景, 以两家企业的能效水平作为评价对象, 对其进行综合量化水平分析。首先, 根据图1建立甲乙两家企业制造能效评价指标体系, 经过相关计算得到的整个底层各评价指标值如表1所示。

按照公式(6)、(7)对甲、乙两厂的各项指标数据值进行归一化处理。甲厂结果为:

$$A = [0.68 \ 0.86 \ 0.60 \ 0.52 \ 0.84 \\ 0.67 \ 0.83 \ 0.54 \ 0.68 \ 0.59 \ 0.58]$$

乙厂的结果为:

$$B = [0.59 \ 0.61 \ 0.69 \ 0.66 \ 0.75 \\ 0.77 \ 0.66 \ 0.68 \ 0.83 \ 0.66 \ 0.54]$$

表1 实例评价指标值
Tab.1 Example evaluation index values

总目标	一级指标	二级指标	甲	乙
产品综合能效水平	产品能效指标	万元产品能耗	3.8	2.5
		万元增加值能耗	3.7	5.1
		单位产品综合能耗	8.9	9.2
		单位产品节能量	1.9	2.6
	设备能效指标	机床设备能耗	6.4	5.5
		能源输送设备能耗	6.7	5.8
能源加工转换效率		0.60	0.65	
设备整体效率		0.7	0.68	
任务流程能效指标	生产工艺能效	0.8	0.6	
	生产资源调度能耗	6.6	7.8	
		能源输送效率	0.68	0.5

3.1 指标权重计算

3.1.1 AHM 权重计算

首先, 根据领域专家对不同指标的打分情况建立 AHM 算法需要的判断矩阵, 经过 AHM 算法的处理后, 得到整个评价指标体系中底层指标对各个等级指标的权重如下:

一级指标权重 W_a :
[0.062 4 0.094 6 0.084 4 0.102 5 0.104 5
0.089 0 0.081 7 0.102 6 0.106 1 0.095 9 0.076 3]

二级指标权重:

- 1) 产品层指标权重
 $W_{a1}=[0.155 6 0.279 6 0.250 0 0.314 8]$
- 2) 任务层指标权重
 $W_{a2}=[0.361 1 0.277 8 0.361 1]$
- 3) 设备层指标权重
 $W_{a3}=[0.173 8 0.387 3 0.288 9 0.150 0]$

3.1.2 熵权计算

根据表 1 中的制造系统评价指标数据, 在对其完成归一化计算之后, 根据熵权的计算方法得出评价指标的熵权值。

一级指标权重 W_b :
[0.049 4 0.285 9 0.047 9 0.138 8 0.031 5
0.047 5 0.128 3 0.129 8 0.097 2 0.030 9 0.012 6]

二级指标权重:

- 1) 产品层指标权重
 $W_{b1}=[0.094 7 0.547 6 0.091 8 0.265 9]$
- 2) 任务层指标权重
 $W_{b2}=[0.152 1 0.229 0 0.618 9]$
- 3) 设备层指标权重
 $W_{b3}=[0.480 0 0.359 5 0.114 1 0.046 4]$

3.1.3 综合权重的计算

首先利用 AHM 法与熵权法获得指标的主、客观权重, 再根据公式(11)计算出组合后的权重。在确定偏重权重 θ 时, 为了突出某些指标在生产过程中的重要性, 专家经验计算得到的主观权重就要占据更大的比重。本文取偏重权重 $\theta=0.61$ 。

一级指标评价权重矩阵 W :

[0.057 9 0.161 6 0.071 6 0.115 2 0.079 0
0.074 5 0.098 0 0.112 1 0.103 0 0.073 1 0.054 0]

二级指标评价权重矩阵:

- 1) 产品层指标权重
 $W_1=[0.134 3 0.373 4 0.194 6 0.297 7]$
- 2) 任务层指标权重
 $W_2=[0.288 0 0.260 7 0.451 3]$
- 3) 设备层指标权重
 $W_3=[0.281 0 0.377 6 0.227 7 0.113 7]$

3.2 能效水平评价

在得到上面计算得到的权重之后, 利用贝叶斯模型评估甲、乙两厂的产品制造过程综合能效水平以及单一方面的能效水平。

3.2.1 甲厂评价结果

(1) 一级指标评价结果:

$P_{s1}=[0.045 5 0.073 1 0.287 0 0.339 5 0.254 9]$
 $P_{v1}=0.339 5$

一级指标能效水平为 II 级。

(2) 二级指标评价结果:

产品层评价结果:
 $P_{s11}=[0.041 3 0.066 9 0.336 0 0.260 3 0.295 6]$
 $P_{v11}=0.336 0$

产品层指标评价为 III 级。

任务层评价结果:

$P_{s12}=[0.044 4 0.062 6 0.108 6 0.372 5 0.411 9]$
 $P_{v12}=0.411 9$

任务层指标能效水平为 I 级。

设备层评价结果:

$P_{s13}=[0.050 0 0.085 2 0.341 6 0.439 9 0.083 3]$
 $P_{v13}=0.439 9$

设备层指标能效水平为 II 级。

3.2.2 乙厂评价结果

(1) 一级指标评价结果

$P_{s2}=[0.047 3 0.074 0 0.193 9 0.527 7 0.157 1]$
 $P_{v2}=0.527 7$

一级指标能效水平为 II 级。

(2) 二级指标评价结果

产品层评价结果:

$$P_{s21} = [0.0510 \ 0.0828 \ 0.2248 \ 0.5425 \ 0.0988]$$

$$P_{v21} = 0.5425$$

产品层指标能效水平为 II 级。

任务层评价结果:

$$P_{s22} = [0.0463 \ 0.0689 \ 0.1370 \ 0.5766 \ 0.1712]$$

$$P_{v22} = 0.5766$$

任务层指标能效水平为 II 级。

设备层评价结果:

$$P_{s23} = [0.0424 \ 0.0642 \ 0.1706 \ 0.4807 \ 0.2422]$$

$$P_{v23} = 0.4807$$

设备层指标能效水平为 II 级。

3.2.3 结果分析

根据以上计算分析得到的结果, 甲厂的整体能效水平评价结果为 II 级, 乙厂的整体能效水平等级也为 II 级, 甲、乙两厂在综合能效水平上表现相同。接下来从 3 个二级指标来具体分析, 甲厂的 3 个指标能效水平层次不一, 产品能效水平为 III 级, 任务层能效水平为 I 级, 设备层能效水平为 II 级。在产品层面, 甲厂获得相同的产品需要消耗更多的能源, 需要加以重点改进, 设备层面上也需要再进一步提高能效水平, 任务流程方面甲厂的表现较好。乙厂的 3 个二级指标的表现相同, 都为 II 级水平。乙厂整个产品加工制造过程中能效水平齐平, 其能效水平表现不存在突出的方面, 也没有明显的不足的地方。乙厂需要在 3 个方面做出进一步分析, 针对具体问题加以改进, 来提高自身的产品制造能效水平。

4 数据仿真分析

在评价过程中, 由于客观权重的计算分析都是对当前获得的指标数据运用某一种或多种的数学处理方法进行运算后得到的, 所以得到的客观权重值可能会因为某些指标值波动而发生大的改变。客观权重的变化又会使评价结果改变, 降低其结果的准确性。为了评估指标波动对本文所提方法影响的

程度, 本文选取六组生产加工数据, 即六组待评估样本 $\{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6\}$, 来验证方法的可靠性。每组待评样本按照本文中建立的指标体系要求都包含 11 个评价指标值。每组样本的指标经过无量纲化处理后的值如表 2 所示。

表 2 待评估方案指标值
Tab. 2 Index values of the project to be evaluated

方案	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
1	0.70	0.74	0.81	0.90	1.00	0.66
2	0.88	0.79	0.98	0.72	0.63	0.80
3	0.60	0.69	0.59	0.70	0.75	0.89
4	0.72	0.87	0.58	0.60	0.63	0.64
5	0.90	0.64	0.94	0.82	0.80	0.72
6	0.66	0.65	0.96	0.81	0.91	0.77

方案	c_7	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}
1	0.68	0.59	0.74	0.60	0.81
2	0.85	0.69	0.72	0.59	0.69
3	0.66	0.74	0.65	0.70	0.78
4	1.00	0.64	0.65	0.90	0.71
5	0.65	0.86	0.59	0.67	0.80
6	0.70	0.82	0.90	0.61	0.73

表中第 4 个样本的 c_3 值为整个验证方案集中的极小值。为了对比极值的改变对一般的熵权法与对文中提出的组合权重的能效评估方法两者评估结果的影响程度。我们将样本 4 中的全局极小值 c_3 从初始的 0.58 调整到 0.32, 然后再调整到 0.11, 检验不同权重确定方式下评估结果受极值影响的变化程度。两种方式的经过评估的结果如下:

(1) 采用单一熵权评价结果

$$P_{s(0.58)} = \begin{bmatrix} 0.0461 & 0.0687 & 0.1499 & 0.4458 & 0.2895 \\ 0.0451 & 0.0672 & 0.1521 & 0.4601 & 0.2755 \\ 0.0463 & 0.0709 & 0.1661 & 0.5307 & 0.1860 \\ 0.0538 & 0.0835 & 0.2070 & 0.4028 & 0.2529 \\ 0.0509 & 0.0799 & 0.2041 & 0.4701 & 0.1949 \\ 0.0496 & 0.0765 & 0.1874 & 0.4389 & 0.2476 \end{bmatrix}$$

$$P_{s(0.32)} = \begin{bmatrix} 0.0475 & 0.0697 & 0.1435 & 0.4226 & 0.3167 \\ 0.0472 & 0.0680 & 0.1409 & 0.3975 & 0.3464 \\ 0.0516 & 0.0814 & 0.2135 & 0.4837 & 0.1698 \\ 0.0574 & 0.0913 & 0.2455 & 0.3836 & 0.2222 \\ 0.0552 & 0.0885 & 0.2433 & 0.4363 & 0.1768 \\ 0.0541 & 0.0858 & 0.2302 & 0.4119 & 0.2180 \end{bmatrix}$$

$$P_{s(0.11)} =$$

0.049 0	0.070 7	0.136 7	0.398 3	0.345 3
0.049 4	0.068 8	0.129 0	0.331 7	0.421 0
0.057 1	0.092 5	0.263 3	0.434 3	0.152 8
0.061 3	0.099 5	0.286 0	0.363 4	0.189 9
0.059 7	0.097 4	0.284 4	0.400 7	0.157 8
0.058 9	0.095 6	0.275 1	0.383 4	0.186 9

(2) 采用组合权重评价结果

$$P'_{s(0.58)} =$$

0.045 8	0.068 5	0.151 9	0.438 7	0.295 2
0.041 9	0.062 7	0.141 7	0.515 0	0.238 7
0.044 7	0.067 2	0.146 8	0.536 5	0.204 7
0.053 5	0.082 5	0.197 4	0.417 9	0.248 8
0.050 5	0.078 2	0.191 9	0.457 3	0.222 0
0.048 6	0.073 9	0.171 8	0.437 5	0.268 1

$$P'_{s(0.32)} =$$

0.046 2	0.068 8	0.149 7	0.430 6	0.304 7
0.042 6	0.063 0	0.137 8	0.493 1	0.263 5
0.046 5	0.070 9	0.163 4	0.520 1	0.199 1
0.054 7	0.085 2	0.210 8	0.411 2	0.238 0
0.052 0	0.081 2	0.205 6	0.445 5	0.215 7
0.050 2	0.077 2	0.186 7	0.428 1	0.257 8

$$P'_{s(0.11)} =$$

0.046 8	0.069 2	0.147 3	0.422 1	0.314 7
0.043 4	0.063 2	0.133 7	0.470 1	0.289 6
0.048 5	0.074 7	0.180 9	0.502 8	0.193 1
0.056 1	0.088 0	0.225 0	0.404 1	0.226 7
0.053 6	0.084 4	0.220 0	0.433 0	0.209 0
0.051 9	0.080 6	0.202 5	0.418 1	0.246 9

从上面的对比的结果来看, 在其他数据不变、仅仅改变全局极值的情况下, 六组评估样本的最大概率 P_v 改变都比较小, 都不影响最中的评价结果等级。如图 2 所示, 采用熵权法确定权值的方法得到的结果波动明显, 样本二的评价等级由 II 级变为 I 级, 样本一的最大概率与次大概率的差距也缩小明显, 评价结果的准确度降低。

然而, 从图 3 可以看出, 采用改进后的组合权重评价方法受极值变化的影响程度较小。样本数据评价结果变化最大的为第二组样本, 当极小值从

0.58 调整到 0.32 时, 其对极值的敏感度最大值为 4.2%; 极值由 0.32 调整到 0.11 时, 敏感度最大值为 4.6%。即使相较于变化幅度最大的方案二来讲, 在极值直接从 0.58 跃变到 0.11 时, 其最大概率 P'_s 值的敏感度仅仅为 8.7%。因此, 由上面的结果可以得出结论, 本方法对于极值的变化敏感度很小。因此, 本文提出的基于组合权重的改进贝叶斯评价方法更稳定、可靠。

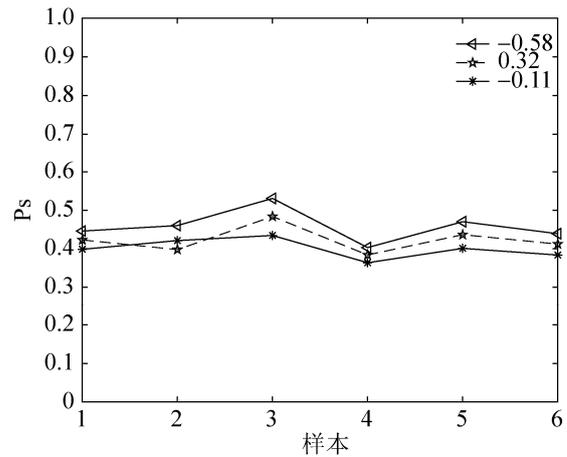


图 2 极值对 P_s 的影响
Fig. 2 Effect of extremum on P_s

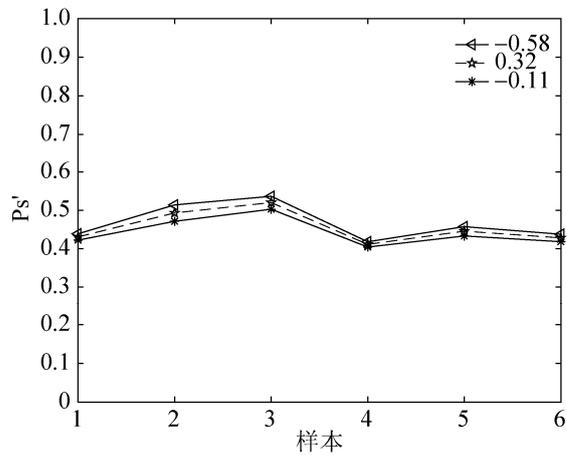


图 3 极值对 P'_s 的影响
Fig. 3 Effect of extremum on P'_s

表 3 改进后各方案敏感度值

方案	1	2	3	4	5	6
0.58~0.32	1.8	4.2	3.0	1.6	2.6	2.1
0.32~0.11	2.0	4.6	3.3	1.7	2.8	2.3

5 结论

对制造业来说, 能耗巨大, 节能是重中之重。利用能效评价可以更好地了解能源利用现状, 为提高企业能源利用率指明方向。因此, 对企业制造系统进行能效评价是必要的。本文提出的基于改进贝叶斯评价模型的能效评价方法, 解决了能效评价过程中的主观性偏见的问题, 减小了客观极值波动对评价结果的影响, 实例及仿真验证了该方法的合理性。制造企业通过对生产指标的量化评价分析, 可以针对生产过程的绩效表现进行改进, 提高企业能源利用水平, 推进绿色制造。

参考文献:

- [1] Madan J, Mani M, Lee J H, et al. Energy performance evaluation and improvement of unit-manufacturing processes: injection molding case study[J]. *Journal of Cleaner Production* (S0959-6526), 2015, 105: 157-170.
- [2] 郑朝闻. 制造系统运行绩效分析评价方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
Zheng Z W, Research on Performance Analysis and Evaluation Method of Manufacturing System[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [3] 张浩, 杨佳妮, 苏翔. 基于信息熵及超效率 SBM 模型的柔性制造系统绩效评价[J]. *现代制造工程*, 2014, 34(7): 16-20.
Zhang H, Yang J N, Su X. Using entropy-based super SBM model for evaluating flexible manufacturing systems[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2014, 34(7): 16-20.
- [4] Ma C Y, Wu H B, Zhang Y Q, et al. Application of AHP to Comprehensive Technology Evaluation of Advanced Treatment of Printing and Dyeing Wastewater[J]. *Environmental Science & Technology* (S1003-6504), 2011, 34(4): 135-139.
- [5] Xu Y, Pei D, Wang J. Research and application of a hybrid model based on dynamic fuzzy synthetic evaluation for establishing air quality forecasting and early warning system: A case study in China [J]. *Environmental Pollution*(S0269-7491), 2017, 223: 435-448.
- [6] Fu Y, Wu X P, Ye Q, et al. An approach for information systems security risk assessment on fuzzy set and entropy-weight[J]. *Acta Electronica Sinica*(S1489-1494), 2010, 38(7): 1489-1494.
- [7] Shaverdi M, Ramezani I, Tahmasebi R, et al. Combining Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS with Financial Ratios to Design a Novel Performance Evaluation Model[J]. *International Journal of Fuzzy Systems*(S1562-2479), 2016, 18(2): 248-262.
- [8] Lee S K, Mogi G, Hui K S. A fuzzy analytic hierarchy process (AHP)/data envelopment analysis (DEA) hybrid model for efficiently allocating energy R&D resources: In the case of energy technologies against high oil prices [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* (S1364-0321), 2013, 21: 347-355.
- [9] Massoudieh A, Sharifi S, Solomon D K. Bayesian evaluation of groundwater age distribution using radioactive tracers and anthropogenic chemicals [J]. *Water Resources Research* (S0043-1397), 2012, 48(9): 165-175.
- [10] Wang Q, Liu F, Li C. An integrated method for assessing the energy efficiency of machining workshop[J]. *Journal of Cleaner Production* (S0959-6526), 2013, 52(4): 122-133.
- [11] May G, Barletta I, Stahl B, et al. Energy management in production: A novel method to develop key performance indicators for improving energy efficiency[J]. *Applied Energy* (S0306-2619), 2015, 149(2015): 46-61.
- [12] Rahimifard S, Seow Y, Childs T. Minimising Embodied Product Energy to support energy efficient manufacturing [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* (S0007-8506), 2010, 59(1): 25-28.
- [13] 程乾生. 层次分析法 AHP 和属性层次模型 AHM[J]. *系统工程理论与实践*, 1997, 17(11): 25-28.
Cheng Q S. Analytic Hierarchy Process (AHP) and Attribute Hierarchical Model (AHM)[J]. *Systems Engineering -Theory & Practice*, 1997, 17(11): 25-28.
- [14] 黄海新, 孔畅, 于海斌, 等. 自适应特征熵权模糊 C 均值聚类算法的研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(1): 219-223.
Huang H X, Kong C, Yu H B, et al. Research on adaptive entropy weight fuzzy c-means clustering algorithm[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2016, 36(1): 219-223.